

УДК 504.5+581.14

**ВЛИЯНИЕ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ
НА ВЕГЕТАЦИЮ КУКУРУЗЫ НА ЗАГРЯЗНЕННОМ
АЛИФАТИЧЕСКИМ УГЛЕВОДОРОДОМ
ВЫЩЕЛОЧЕННОМ ЧЕРНОЗЕМЕ**

А.Ф. Халилова, А.П. Денисова, И.П. Бреус

Аннотация

В вегетационном опыте исследовано влияние повышенных доз аммиачной селитры (0.6 и 0.9 г N/kg) на линейный рост и накопление биомассы растениями кукурузы (*Zea mays* L., сорт «Катерина») на среднегумусном выщелоченном черноземе в условиях его искусственного загрязнения тридеканом (1 и 2 вес.%) – типичным представителем углеводородов алифатического ряда. Полученные эффекты сопоставлены с результатами опыта с использованием стандартной дозы аммиачной селитры (0.3 г N/kg) на той же почве. На основе обобщения данных двух вегетационных опытов показано, что внесение повышенных доз минерального азота полностью устраняет негативное влияние тридекана на рост и развитие кукурузы при обоих уровнях загрязнения почвы. Оптимальной (по эффективности и экономической целесообразности) для устранения фитотоксичности загрязненной почвы дозой вносимого азотного удобрения является доза 0.6 г N/kg.

Ключевые слова: почвы, углеводороды, загрязнение, фитотоксичность, кукуруза, удобрение.

Введение

Нефть и нефтепродукты являются приоритетными загрязнителями биосферы. К настоящему времени неблагоприятная экологическая ситуация сложилась не только в большинстве нефтедобывающих и перерабатывающих регионов мира, но и в каждой промышленно развитой стране в связи с наличием сети тепловых электростанций, развитого автотранспорта, широким использованием промышленных углеводородных растворителей и других нефтепродуктов. В частности, по данным Государственного доклада о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды РТ в 2006 и 2007 гг., до 50% случаев загрязнения земельных ресурсов в республике было связано с нефтью и нефтепродуктами, которые произошли в результате прорывов нефтепроводов, разливов нефти при проведении работ и т. д. [1, 2].

Если нефтяные загрязнения характерны в основном для районов добычи, переработки и транспортировки нефти, то загрязнения нефтепродуктами, такими, как дизельное топливо, керосин, смазочные масла, мазут и др., распространены повсеместно. При этом следует отметить, что в нефтяных продуктах преобладают именно алифатические фракции. В результате загрязнения почв

алифатическими углеводородами (УВ) отличается наибольшей масштабностью по сравнению с другими классами УВ.

При загрязнении почв нефтью и нефтепродуктами существенно ухудшается их экология, физические и физико-химические свойства, и значительные территории становятся непригодными для сельскохозяйственного использования в отношении большинства культур. В связи с этим актуальность приобретает поиск растений, способных достаточно продуктивно произрастать на таких почвах, и оценка их роста и развития в этих условиях. Выявленные культуры далее тестируют на наличие фиторемедиационного эффекта, заключающегося в усилении биodeградации УВ в почве под растениями.

В ряде работ было продемонстрировано, что к растениям, устойчивым к УВ-загрязнению, относится кукуруза [3–5]. Так, кукуруза обыкновенная сорта «Катерина» и «Скандия» (*Z. mays*) по результатам ранее проведенного нами скрининга на токсикорезистентность культурных растений при загрязнении выщелоченного чернозема 1 и 2% УВ (керосина – смеси алифатических УВ и индивидуального тридекана) проявила себя как одно из наиболее устойчивых по показателям всхожести и энергии прорастания [4]. В ряде работ [5, 6], в том числе выполненных нами [4], наряду с высокой устойчивостью для кукурузы отмечали фиторемедиационный эффект в отношении нефтяных и топливных УВ.

Однако далеко не всегда проявляется фиторемедиационный эффект у растений на почвах, загрязненных нефтяными УВ. Для усиления процессов фиторемедиации, а также снижения фитотоксичности почвы используют такие сельскохозяйственные приемы, как внесение полных (или только азотных) удобрений [7–9].

Кукуруза является одной из основных сельскохозяйственных культур Республики Татарстан (РТ), поэтому ее потенциальные возможности должны быть всесторонне исследованы. В республике широко распространены ее посевы на силос: в 2008 г. при общей площади под сельскохозяйственными культурами 1.5 млн. га они занимали около 100 тыс. га.

Ранее в вегетационном эксперименте нами было показано, что на слабокислом (рН 5.5) выщелоченном черноземе, загрязненном тридеканом в концентрации 1%, внесение аммиачной селитры в дозе 0.3 г N/kg (обычно рекомендуемой для использования в вегетационных опытах с кукурузой в качестве стандартной, сопоставимой с оптимальным эффектом их применения в полевых условиях [10]) существенно (до 34%) снижало угнетение накопления надземной биомассы кукурузы, вызванное загрязнением [11]. Снижение фитотоксического эффекта при внесении минерального азотного удобрения, по-видимому, было связано с частичным восстановлением азотного питания кукурузы. Согласно этим результатам, а также результатам ряда других вегетационных и лабораторных опытов, проведенных нами на выщелоченном черноземе [11, 12], можно ожидать, что при использовании более высокой дозы азотного удобрения снижение токсического влияния УВ будет более значительным. Дополнительному усилению этого эффекта, возможно, будет способствовать и раскисление выщелоченного чернозема (исходная рН 5.7).

В этой связи целью данной работы явилась оценка влияния повышенных доз аммиачной селитры (0.6 и 0.9 г N/kg) на линейный рост и накопление биомассы кукурузы на предварительно известкованной почве в условиях

ее загрязнения тридеканом. Эффективность применения азотного удобрения исследовали при двух уровнях загрязнения: 1 и 2% тридекана.

1. Материалы и методы

Опыт проводили на выщелоченном черноземе – тяжелосуглинистой почве, типичной для Татарского Закамья, региона интенсивной нефтедобычи и нефтепереработки. Агрохимические характеристики исходной почвы были следующими: pH 5.7; Сорг. 3.99%; азот валовый 0.3%; соотношение C : N 13.3 : 1; доступные формы элементов питания: азот щелочно-гидролизуемый N, фосфор подвижный P_2O_5 и калий обменный K_2O (144, 350 и 189 мг/кг соответственно). В качестве загрязнителя был использован *n*-тридекан – типичный представитель УВ-алифатического ряда. Почву искусственно загрязняли в концентрации 1 и 2 вес.% от веса абсолютно сухой почвы. В качестве минерального удобрения использовали аммиачную селитру (NH_4NO_3) в двух дозах: 0.6 и 0.9 г N/кг. Исследовали растения кукурузы обыкновенной (*Zea mays* L., сорт «Катерина»). Семена растений были предоставлены НПО «Нива Татарстана»; их всхожесть составляла 98%. Растения выращивали в вегетационном домике на территории Казанского городского эколого-биологического центра юннатов при естественных освещении и температуре до наступления фазы 7–8-го листа и образования метелки; длительность эксперимента составила 62 сут.

Агрохимические характеристики почв определяли в соответствии со стандартными методическими указаниями: содержание гумуса – по Тюрину, pH_{KCl} – потенциометрически, содержание подвижного фосфора и обменного калия – по Чирикову, щелочно-гидролизуемого азота – по Корнфилду, общего азота – по Кьельдалю [13]. Линейный рост исследуемых растений измеряли на 17, 24, 31, 39, 46, 55 и 61-е сутки эксперимента. Воздушно-сухую биомассу надземной и корневой части растений определяли методом взвешивания после высушивания при комнатной температуре [14]. Схема опыта включала варианты с незагрязненной и загрязненной почвой – без растений и неудобренной почвой; с добавлением аммиачной селитры NH_4NO_3 в дозах 0.6 и 0.9 г N/кг; только с растениями кукурузы; а также с сочетанием выращивания кукурузы с внесением в почву NH_4NO_3 в дозах 0.6 и 0.9 г N/кг.

Предварительно почву известковали в течение 2-х недель, используя доломит Матюшинского месторождения РТ (фракция < 0.25 мм) в дозе по 3.0 г $CaCO_3$ / кг почвы. Далее проводили загрязнение почвы тридеканом (1 и 2% в соответствующих вариантах) с последующим увлажнением дистиллированной водой до 20 вес.% (60% от полной влагоемкости почвы) и компостировали в течение 2.5 недель. После этого в почву вносили аммиачную селитру (0.6 и 0.9 г N/кг в соответствующих вариантах опыта). Через 3 сут в каждый вегетационный сосуд высевали семена кукурузы. Все варианты опыта исследовали в 3-кратной биологической повторности.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью стандартной компьютерной программы. Для оценки достоверности различий между результатами в вариантах опыта использовали критерий Стьюдента [15]. При этом $p \leq 0.05$ принимали за достоверный уровень значимости.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Линейный рост растений кукурузы.

Влияние уровня загрязнения почвы тридеканом. Загрязнение почвы тридеканом в обеих концентрациях сопровождалось явно выраженным фитотоксическим действием в отношении линейного роста кукурузы, рис. 1, *а–в*. В течение всего эксперимента наблюдали угнетение роста растений: при уровнях загрязнения производственного выщелоченного чернозема 1 и 2% – в 1.5–1.9 и 1.8–2.1 раза соответственно. Таким образом, дозозависимый характер влияния УВ-загрязнения на данный показатель в опыте не проявился. В ранее проведенном нами эксперименте на слабокислом выщелоченном черноземе с близкими характеристиками при его загрязнении 1% тридекана степень угнетения линейного роста растений того же сорта кукурузы была примерно такого же порядка (в 1.3–1.7 раза) [11]. Можно сделать вывод, что раскисление выщелоченного чернозема (до 7.2) также не оказывало заметного влияния на рост кукурузы.

Эффект доз азотного удобрения. Внесение повышенных доз аммиачной селитры (0.6 и 0.9 г N/кг) в незагрязненную почву достоверно не повлияло на линейный рост кукурузы: в течение опыта высота растений оставалась на одном, близком к контролю, уровне (рис. 1, *а*). Другую картину от использования удобрения наблюдали на фоне загрязнения почвы тридеканом: при каждой из его концентраций (1 и 2%) внесение обеих повышенных доз удобрения резко стимулировало линейный рост растений (рис. 1, *б, в*). При этом повышение уровня загрязнения от 1 до 2% не снизило стимулирующий эффект минерального азота на рост кукурузы. Для обеих доз аммиачной селитры показатель линейного роста существенно не различался в течение всего вегетационного опыта: в случае 0.6 и 0.9 г N/кг отмечали его увеличение соответственно в 1.5–2.3 и 1.7–2.3 раза относительно загрязненного варианта без удобрения.

Близость абсолютных величин и динамики линейного роста растений на загрязненном и незагрязненном черноземе свидетельствовала об отсутствии фитотоксического действия УВ на рост кукурузы при внесении минерального азота в обеих дозах. Этот вывод был справедлив в отношении обоих уровней загрязнения почвы. Заметим, что в ранее проведенном нами вегетационном эксперименте на слабокислом выщелоченном черноземе при 1%-ном загрязнении внесение азотного удобрения в стандартной дозе (0.3 г N/кг) также устраняло фитотоксический эффект тридекана на линейный рост кукурузы [11].

3.2. Накопление надземной биомассы растениями кукурузы. Известно, что снижение линейного роста растений при загрязнении УВ не всегда сопровождается снижением их биомассы [16]. Так, например, если депрессия надземной биомассы райграса на почве, загрязненной 0.8% дизельного топлива, наблюдалась на протяжении всего эксперимента и к его завершению составила 30%, то угнетение линейного роста отмечали только в первые два месяца, а в последующие три месяца высота растений достигла уровня незагрязненного варианта.

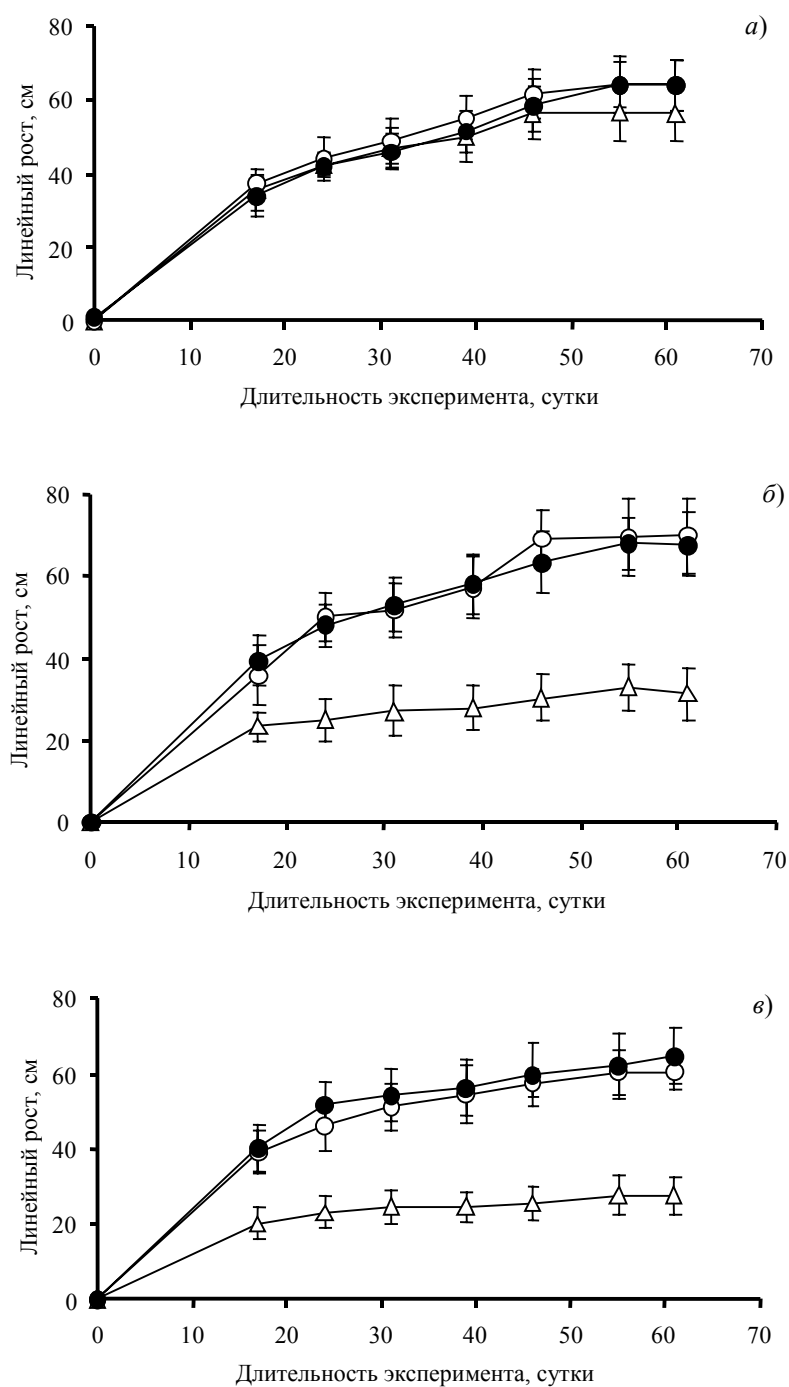


Рис. 1. Влияние повышенных доз азотного удобрения на динамику линейного роста кукурузы в незагрязненной (а) и загрязненной 1 вес.% (б) и 2 вес.% ТД (в) почве. Варианты опыта: Δ – почва без удобрения; ○ – 0.6 г N/кг; ● – 0.9 г N/кг

Табл. 1

Влияние углеводородного загрязнения, а также повышенных доз азотного удобрения на биометрические показатели кукурузы

Уровень загрязнения тридеканом	Вариант опыта	Надземная биомасса, г/сосуд	Масса корней, г/сосуд	Отношение «надземная/корневая биомасса»
0%	Без удобрения	19.2 ± 1.2	26.7 ± 1.5	0.7 ± 0.1
	0.6 г N/кг	30.4 ± 2.3	36.4 ± 16.4	0.8 ± 0.2
	0.9 г N/кг	31.1 ± 4.6	24.1 ± 2.5	1.3 ± 0.3
1%	Без удобрения	4.1 ± 0.1	12.97 ± 2.1	0.3 ± 0.1
	0.6 г N/кг	31.9 ± 0.6	35.1 ± 9.1	0.9 ± 0.2
	0.9 г N/кг	33.9 ± 2.4	32.9 ± 2.2	1.0 ± 0.3
2%	Без удобрения	2.3 ± 0.1	10.1 ± 0.5	0.2 ± 0.0
	0.6 г N/кг	20.9 ± 0.1	31.3 ± 2.9	0.7 ± 0.1
	0.9 г N/кг	21.8 ± 0.2	24.7 ± 2.2	0.9 ± 0.1

Влияние уровня загрязнения почвы тридеканом. В нашем эксперименте загрязнение выщелоченного чернозема вызвало снижение как высоты кукурузы, так и накопления ею надземной биомассы, однако в отношении последнего параметра фитотоксическое действие было более существенным: снижение биомассы кукурузы при 1 и 2% УВ составило соответственно 4.7 и 8.2 раза к контролю (табл. 1). Кроме того, между уровнем загрязнения почвы и накоплением биомассы была обнаружена достоверная обратная зависимость (коэффициент корреляции составил -0.91). В работе Тезара с соавторами [17] также отмечали рост депрессии биомассы райграса (*Lolium multiflorum* cv. Lolita) с увеличением уровня загрязнения почвы дизельным топливом (0.5, 1 и 2.5%). С другой стороны, для люцерны ее ингибирование наблюдали только, начиная с концентрации 1%, тогда как при 0.5% отмечали даже стимуляцию накопления зеленой массы. Полученные в нашем эксперименте результаты согласуются и с данными Исуфи с соавторами [18], где загрязнение почвы сырой нефтью в концентрациях 1, 5 и 10% оказывало дозозависимое токсическое влияние на накопление надземной биомассы кукурузы, в отличие от ее линейного роста.

Аналогичные результаты были получены и Киреевой с соавторами [19], которые проследили четкую линейную зависимость уменьшения сухой массы пшеницы от концентрации товарной нефти (1, 2 и 4%, коэффициент корреляции составил -0.98), в то время как высота растений при всех уровнях загрязнения оставалась примерно одинаковой.

Таким образом, в отличие от линейного роста, накопление надземной биомассы растений является наиболее чувствительным и интегральным показателем фитотоксичности загрязненной почвенной среды.

Эффект доз азотного удобрения. Внесение повышенных доз аммиачной селитры в незагрязненную почву стимулировало увеличение надземной биомассы кукурузы: для 0.6 и 0.9 г N/кг – на 58 и 62%, соответственно (табл. 1).

Еще большая стимуляция наблюдалась на загрязненной почве. При уровне загрязнения 1% на фоне 0.6 и 0.9 г N/кг величина надземной биомассы кукурузы

возрастала соответственно в 7.8 и 8.3 раза. При этом абсолютные значения биомассы были на 60% выше незагрязненного варианта без удобрения и на уровне значений соответствующих незагрязненных вариантов с аммиачной селитрой (табл. 1). Другими словами, при 1%-ном уровне загрязнения на фоне повышенных доз минерального азота фитотоксический эффект в отношении накопления биомассы кукурузой отсутствовал.

На фоне 2% УВ при использовании аммиачной селитры абсолютные величины надземной биомассы были несколько меньше (на 40–60%), чем в случае 1% тридекана. В то же время при внесении минерального азота отмечали сильное снижение фитотоксического влияния при 2%-ном загрязнении: при 0.6 и 0.9 г N/кг биомасса снижалась соответственно в 9.1 и 9.5 раз относительно контроля (табл. 1).

В ранее проведенном нами эксперименте было показано, что внесение в загрязненный тридеканом выщелоченный чернозем меньшей (0.3 г N/кг) дозы аммиачной селитры устраняло только угнетение линейного роста кукурузы, в то же время наблюдалась 36%-ная депрессия биомассы растений [11]. Это сравнение показывает, что указанная доза, в отличие от повышенных доз аммиачной селитры (0.6 и 0.9 г N/кг), недостаточна для устранения токсического воздействия тридекана на вегетацию кукурузы. Учитывая это, а также то, что влияние обеих повышенных доз азота на депрессию надземной биомассы и линейного роста было одинаковым (табл. 1, рис. 1), внесение 0.6 г N/кг минерального азота можно считать оптимальным для снижения фитотоксического эффекта выщелоченного чернозема, загрязненного 1 и 2% алифатического УВ.

Обсуждая вопрос о применении доз удобрений (полных или только азотных) для оптимизации роста и развития растений при уровнях загрязнения почвы, близких к нашему опыту (до 5%), следует отметить, что чаще всего исследователи склоняются в пользу применения их в более высоких дозах (от 0.4 г/кг и выше) по сравнению с дозами, рекомендуемыми агрохимической службой [8, 9]. Так, Киркпатриком с соавторами [8] было показано, что в условиях загрязнения почвы сырой нефтью (1.66%) внесение хлористого аммония в наименьшей из исследованных им доз (0.32 г N/кг) незначительно увеличило накопление надземной биомассы проса тростникового (*Pennisetum glaucum* L.), проса ветвистого (*Brachiaria ramosa* L.) и сорго суданского (*Sorghum sudanense*) в сравнении с загрязненным вариантом без удобрений. При использовании же более высоких концентраций удобрения (0.425, 0.640 и 1.275 г N/кг), сопоставимых с используемыми в нашем опыте дозами аммиачной селитры, наблюдалось существенное дозозависимое увеличение надземной биомассы всеми растениями. В другой работе при более высоком уровне загрязнения почвы сырой нефтью (5%) не было показано разницы в величинах зеленой массы ветвянки бризоцветной (*Brachiaria brizantha*) при внесении полного коммерческого удобрения в относительно низких дозах (0.2, 0.3 и 0.4 г NPK/кг) через 14 недель вегетационного опыта [9]. Дозозависимое увеличение данного показателя было обнаружено только при использовании более высоких доз удобрения (0.4, 0.6 и 0.8 г NPK/кг) на 22-й неделе эксперимента.

3.3. Корневая биомасса растений кукурузы. При выращивании растений в условиях загрязнения особый интерес представляет изучение роста накопления биомассы их корней, поскольку именно корни находятся в непосредственном контакте с загрязненной почвой и, соответственно, с УВ. Гидрофобные свойства УВ ограничивают их поступление в растения, а следовательно, и последующую трансформацию внутри них. В результате основным механизмом фиторемедиации УВ-загрязненных почв оказывается деградация загрязнителя ризосферной микрофлорой (ризодеградация) [20].

В условиях УВ-загрязнения наблюдается стремление корней избегать загрязненных участков почвы. Так, в условиях нефтехимического загрязнения вблизи Уфимского промышленного центра наблюдали увеличение степени насыщенности корней в насаждениях сосны обыкновенной, что можно рассматривать как компенсаторный механизм, направленный на ее адаптацию к экстремальным условиям [21]. В работе Хангована и Вивеканадана были выявлены нарушения нормальной ориентации корней и их окончаний на ранних этапах прорастания вигны в условиях полива почвы нефтяной эмульсией [22]. В многочисленных работах показано фитотоксическое влияние загрязнения почвы УВ на накопление корневой биомассы и длину корней, зависящее от химической природы УВ-загрязнителя и его концентрации, типа почвы и вида растения [23–25]. Так, например, в работе Баека с соавторами [24] низкие (0.0001–0.01%) концентрации декана (C_{10}) не ингибировали длину корней кукурузы, тогда как в случае эйкозана (C_{20}) для наивысшей из исследуемых концентраций УВ была показана их депрессия, составившая около 40%. В отличие от алифатических УВ, загрязнение индивидуальными полиароматическими УВ (нафталином, фенантреном и пиреном) усилило ингибирование роста корней во всем диапазоне концентраций 0.0001–0.01%. При этом фитотоксический эффект возрастал с увеличением концентрации поллютантов. Согласно данным Листе и Фельгентреу [26], чувствительность к загрязнению почвы УВ в значительной степени зависит от вида растения. Так, 0.15%-ное загрязнение почвы топливом, содержавшего до 0.0071% полиароматических УВ (ПАУ), не повлияло на накопление корневой массы вики (*Vicia sativa* L.) и белой горчицы (*Sinapsis alba* L.), однако загрязнение на 52.6% угнетало данный параметр у райграса (*L. multiflorum* Lam.).

Поскольку показатель накопления корневой биомассы в большей степени отражает развитие корневой системы по сравнению с длиной корня, его оценка особенно важна для успешного проведения фиторемедиации загрязненных УВ почв.

Влияние уровня загрязнения почвы тридеканом. В нашем опыте загрязнение почвы алифатическим тридеканом ингибировало накопление корневой биомассы кукурузы так же, как и линейный рост растений, и накопление их надземной массы (табл. 1, рис. 1). При этом, с одной стороны, уменьшение корневой биомассы (в 2.1 и 2.6 раза в случае 1 и 2% тридекана соответственно) было сопоставимо со снижением высоты кукурузы, а с другой – оно было не столь существенным по сравнению с изменением надземной биомассы. Как и в случае надземной массы кукурузы, нами был обнаружен дозозависимый характер накопления корневой биомассы от уровня УВ загрязнения почвы (коэффициент корреляции составил –0.94).

В работе Унтербруннера с соавторами [25] на супесчано-суглинистой почве было также установлено, что фитотоксическое влияние нефтяного загрязнения (0.35%) на показатель надземной биомассы гибридного тополя (*Populus nigra* × *maximowiczii* Henry) было более существенным (более 60%), чем для корневой массы (30%). В то же время для тростника обыкновенного депрессия накопления как зеленой, так и корневой массы была примерно одинакова, составляя 60–70% от контроля. Дозозависимое токсическое действие на накопление надземной биомассы вики и райграса наблюдали при загрязнении почвы дизельным топливом (5, 10, 15%), тогда как ингибирование накопления корневой биомассы этих двух культур отмечали только при 15%-ном загрязнении [23].

Эффект доз азотного удобрения. Внесение обеих повышенных доз аммиачной селитры достоверно не повлияло на показатель накопления корневой биомассы кукурузы, выросшей в незагрязненной почве, но стимулировало накопление корневой биомассы в условиях загрязнения тридеканом (табл. 1). Как и в случае с показателями линейного роста и накопления биомассы, на фоне повышенных доз минерального азота полностью отсутствовало фитотоксическое действие УВ в отношении накопления корневой биомассы растений и при обоих уровнях загрязнения тридеканом (1 и 2%) происходило полное восстановление величин корневой биомассы кукурузы.

В некоторых работах указывается на различия в чувствительности разных видов растений к дозам удобрений в условиях загрязнения почвы УВ. Так, Унтербруннером с соавторами [25] были выявлены различия в чувствительности гибридного тополя и тростника обыкновенного (*Phragmites australis*) к дозе азотного и фосфорного удобрений, вносимых в супесчано-суглинистую почву, загрязненную сырой нефтью (0.35%). При внесении даже низких доз удобрений (0.105 г N/кг; 0.03 г P/кг) у тополя не наблюдали депрессии накопления ни корневой, ни надземной биомассы, тогда как для тростника угнетение биомассы корней составило около 40% (в варианте без удобрений – более 80%).

В другой работе изучали изменение биометрических показателей различных видов растений при более высоком уровне загрязнения почвы сырой нефтью (1.66%) в достаточно широком диапазоне доз азотного удобрения (хлорид аммония, 0.32–1.275 г N/кг) [8]. Для проса тростникового авторами было установлено дозозависимое увеличение накопления корневой биомассы, начиная с концентрации удобрения 0.425 г N/кг, однако для суданского проса статистически значимая стимуляция ее накопления наблюдалась только при внесении высоких доз (0.640 и 1.275 г N/кг), а для ветвистого проса – только для самой высокой из исследуемых концентраций. При этом все три растения проявили большую чувствительность показателя надземной биомассы по сравнению с корневой к внесению азота в загрязненную почву при концентрациях 0.425, 0.640 и 1.275 г N/кг.

Близкие результаты получены и в экспериментах с очень высоким (5%) уровнем загрязнения почвы нефтью [9]. Низкие дозы полного коммерческого удобрения (NPK, каждый по 0.2, 0.3 и 0.4 г/кг) не влияли как на корневую, так и на надземную биомассу ветвянки бризоцветной. Влияние удобрения проявлялось только при использовании более высоких доз (NPK по 0.6 и 0.8 г/кг),

причем самое большое увеличение корневой биомассы отмечали при внесении 0.6 г NPK/кг.

3.4. Отношение «надземная/корневая биомасса» у растений кукурузы. Известно, что величина отношения «надземная/корневая масса» иллюстрирует распределение продуктов фотосинтеза между побегом и корневой частью растения для оптимального использования им всех доступных источников питательных элементов в почве [27]. В условиях достаточного количества биогенных веществ в почве продукты фотосинтеза в основном накапливаются в побеге, что ведет к увеличению фотосинтетической поверхности листа и, следовательно, к росту надземной биомассы растения. Напротив, в условиях дефицита воды и питательных элементов, относительно большая часть фотосинтезирующих веществ перераспределяется в корневую систему, приводя к ее усиленному росту, а следовательно, увеличению поглотительной поверхности корня. Поэтому отношение «надземная/корневая масса», контролируемое фитогормонами, не является строго фиксированной величиной и может изменяться в ответ на факторы окружающей среды [28].

Влияние уровня загрязнения почвы тридеканом. В нашем опыте при загрязнении почвы УВ наблюдалось существенное снижение отношения «надземная/корневая биомасса» кукурузы: при 1 и 2% тридекана – в 2.3 и 3.1 раза соответственно, то есть накопление зеленой массы ингибировалось тридеканом в 2–3 раза сильнее, чем корневой биомассы (табл. 1). В результате корневая часть растений значительно (в 3–5 раз) преобладала над побегом, что явилось следствием адаптивной реакции растений, произраставших в стрессовых условиях загрязнения почвы УВ.

Полученные результаты согласуются с данными австралийских ученых [29], где при искусственном загрязнении почвы УВ, преимущественно алифатическими (смесь дизельного топлива и нефти, 0.5 и 1%), для двух злаковых – лимонного сорго (*Symborogon ambiguus*) и рисовидки (*Microlaena stiloides*) – на 60-е и 120-е сутки эксперимента был также отмечен сдвиг этого показателя в сторону корневой биомассы. Напротив, для ветвянки лежачей (*Brachiaria decumbens*, тоже представителя семейства злаковых) достоверных изменений соотношения «надземная/корневая биомасса» не наблюдали.

Предполагается, что фитотоксическое влияние алифатических УВ (в нашем случае тридекана) на накопление надземной и корневой биомасс главным образом обусловлено нарушением поступления воды, питательных веществ и кислорода в ризосферу растений. Причиной этих нарушений считают создаваемый гидрофобным загрязнителем механический барьер между корневой системой и окружающей почвенной средой [3, 30].

Обобщая полученные данные, можно заключить, что соотношение «надземная/корневая биомасса» характеризует способность растения отвечать на изменения окружающей среды, в первую очередь на дефицит питательных элементов. Резкое уменьшение этого показателя для кукурузы (как в нашем опыте) свидетельствует о преобладающем в условиях УВ загрязнения почвы поступлении продуктов фотосинтеза в корневую часть растений.

Эффект доз азотного удобрения. В незагрязненной почве влияния внесения аммиачной селитры на соотношение «корневая/надземная биомасса» кукурузы

в условиях нашего опыта не проявилось: все величины данного показателя оставались на уровне контроля (без внесения азота). При внесении же повышенных доз удобрения (0.6 и 0.9 г N/кг) в загрязненную 1 и 2% УВ почву соотношение «надземная/корневая биомасса» возросло до уровня незагрязненных вариантов (табл. 1).

Как обсуждалось выше, при загрязнении алифатическими УВ водно-воздушный обмен и режим питания растений в почве ухудшаются [3, 30], что выражается главным образом в снижении скорости передвижения воды и водных растворов питательных веществ в почве. В загрязненной УВ почве также усиливаются процессы денитрификации и наблюдается резкий рост и развитие углеродородоксилирующих микроорганизмов [31], что может привести к дефициту биогенного азота для растений.

Учитывая эти результаты, можно предположить, что в нашем опыте внесение повышенных доз азотного удобрения в загрязненную почву создавало в ней высокие локальные концентрации азота, что, в свою очередь, снижало зависимость кукурузы от динамики почвенного раствора и конкуренции с микроорганизмами за биогенный азот. В результате на фоне аммиачной селитры соотношение «надземная/корневая биомасса» увеличивалось до уровня незагрязненного контроля.

Аналогичные данные были получены в работе Меркла с соавторами, где на фоне такой же дозы азотного удобрения (в составе NPK, каждый по 0.6 г/кг), но при более высоком уровне загрязнения почвы нефтью (5%) на 90-е и 180-е сутки эксперимента отношение «надземная/корневая биомасса» для двух растений: ветвянки бризоцветной (*B. brizantha*) и каракана индийского (*Eleusine indica*) – оставалось на уровне незагрязненного контроля [32]. С другой стороны, для растений сыти (*Cyperus aggregatus*) в этих условиях данный параметр все же был сдвинут в сторону накопления корневой биомассы.

Исходя из этих данных, можно заключить, что в нашем эксперименте внесение азотного удобрения в выщелоченный чернозем, загрязненный алифатическим УВ, оптимизировало условия азотного питания кукурузы, следствием чего явилось устранение фитотоксичности почвы в отношении кукурузы.

Заключение

На основе обобщения данных двух вегетационных опытов нами показано, что загрязнение тяжелосуглинистой среднегумусной почвы (выщелоченного чернозема) алифатическим углеводородом – тридеканом – вызывает депрессию как линейного роста (на всех этапах вегетации), так и накопления надземной биомассы растений кукурузы. Отмечена более высокая чувствительность накопления биомассы кукурузы к уровню загрязнения УВ, выражающаяся в снижении этого показателя в 5 и 8 раз при загрязнении почвы 1 и 2% тридекана соответственно.

Внесение повышенных по сравнению со стандартными агрохимическими нормами доз минерального азотного удобрения – аммиачной селитры (0.6 и 0.9 г N/кг) – полностью устраняет негативное влияние УВ на рост и развитие кукурузы, указывая на восстановление азотного питания растений при обоих уровнях загрязнения почвы.

Результаты обоих вегетационных опытов с внесением в загрязненную почву аммиачной селитры в дозах 0.3, 0.6 и 0.9 г N/кг указывают на то, что по эффективности и экономической целесообразности оптимальной дозой вносимого азотного удобрения является доза 0.6 г N/кг, способная устранить фитотоксичность загрязненной почвы.

Установлено, что загрязнение выщелоченного чернозема тридеканом резко (в 2–3 раза) снижает соотношение надземной и корневой биомассы кукурузы, что является адаптивной реакцией растений на стрессовые условия загрязненной почвенной среды. Внесение повышенных доз минерального азота вызывает перераспределение продуктов фотосинтеза в пользу надземной части растений, в результате отношение зеленой и корневой биомассы кукурузы превышает этот показатель для незагрязненной почвы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 09-04-01553-а) и МНТЦ (проект № 3419.2).

Summary

A.F. Halilova, A.P. Denisova, I.P. Breus. The Influence of Nitrogen Nutrition on Maize Vegetation on Leached Chernozem Contaminated with Aliphatic Hydrocarbon.

In a greenhouse-scale experiment, the influence of the raised rates of ammonium nitrate (0.6 and 0.9 g N/kg) upon linear growth and biomass accumulation by maize plants (*Zea mays* L., cultivar “Katerina”) was investigated on leached chernozem under its artificial pollution with tridecane (1 and 2 wt.%) as a typical representative of aliphatic hydrocarbons. The obtained effects were compared with results of experiment in which a standard dose of ammonium nitrate (0.3 g N/kg) was used on the same soil. On the basis of generalizing the results of two greenhouse-scale experiments, the usage of the raised rates of mineral nitrogen was shown to completely eliminate the negative influence of tridecane upon maize growth and development under both levels of soil pollution. Optimal (in terms of efficiency and economic practicability) rate of used nitrogen fertilizer necessary for elimination of contaminated soil phytotoxicity was shown to be that of 0.6 g N/kg of soil.

Key words: soils, hydrocarbons, contamination, phytotoxicity, maize, fertilizer.

Литература

1. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды республики Татарстан в 2006 году / Ред. Н.П. Торсуева – Казань: Заман, 2007. – 502 с.
2. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды республики Татарстан в 2007 году / Ред. Торсуева Н.П. – Казань: Заман, 2008. – 484 с.
3. Гилязов М.Ю. Агроэкологическая характеристика и приемы рекультивации нефтезагрязненных черноземов Республики Татарстан. – Казань: Фэн, 2003. – 228 с.
4. Ларионова Н.Л. Устойчивость растений к загрязнению почвы углеводородами и эффект фиторемедиации: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Казань, 2005. – 22 с.
5. Kaimi E., Mukaidani T., Tamaki M. Screening of twelve plant species for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil // Plant Prod. Sci. – 2007. – V. 10, No 2. – P. 211–218.

6. Chaîneau C.H., Morel J.L., Oudot J. Biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize // J. Environ. Qual. – 2000. – V. 29, No 2. – P. 569–578.
7. Ayotamuno J.M., Kogbara R.B. Determining the tolerance level of *Zea mays* (maize) to a crude oil polluted agricultural soil // African J. Biotechnol. – 2007. – V. 6, No 11. – P. 1332–1337.
8. Kirkpatrick W.D., White P.M. Jr., Wolf D.C., Thoma G.J., Reynolds C.M. Selecting plants and nitrogen rates to vegetate crude-oil-contaminated soil // Int. J. Phytorem. – 2006. – V. 8, No 4. – P. 285–297.
9. Merkl N., Schultze-Kraft R., Arias M. Influence of fertilizer levels on phytoremediation of crude oil-contaminated soils with the tropical pasture grass *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex a. rich.) stapf // Int. J. Phytorem. – 2005. – V. 7, No 3. – P. 217–230.
10. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного опыта. – М.: Наука, 1968. – 263 с.
11. Денисова А.П. Роль природных материалов и минеральных удобрений в связывании и биодegradации топливных углеводов в почвах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Казань, 2009. – 23 с.
12. Архипова Н.С., Денисова А.П., Бреус И.П. Фитотоксичность выщелоченного чернозема, загрязненного н-тридеканом, и влияние удобрений и мелиорантов на его деградацию в почве // Вестн. Оренб. гос. ун-та. – 2007. – № 12. – С. 87–90.
13. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Практикум по агрохимии. – М.: Агропромиздат, 1987. – 512 с.
14. Практикум по физиологии растений / Под ред. В.Б. Иванова. – М.: Изд. центр «Академия». – 2001. – 144 с.
15. Лакин Г.Ф. Биометрия. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.
16. Kaimi E., Mukaidani T., Tamaki M. Effect of rhizodegradation in diesel-contaminated soil under different soil conditions // Plant Prod. Sci. – 2007. – V.10, No 1. – P. 105–111.
17. Tesar M., Reichenauer T.G., Sessitsch A. Bacterial rhizosphere populations of black poplar and herbal plants to be used for phytoremediation of diesel fuel // Soil Biol. Biochem. – 2002. – V. 34, No 12. – P. 1883–1892.
18. Issoufi I., Rhykerd R.L., Smiciklas K.D. Seedling growth of agronomic crops in crude oil contaminated soil // J. Agron. Crop Sci. – 2006. – V. 192, No 4. – P. 310–317.
19. Куреева Н.А., Мифтахова А.М., Салахова Г.М. Рост и развитие растений яровой пшеницы на нефтезагрязненных почвах и при биоремедиации // Агрохимия. – 2006. – № 1. – С. 85–90.
20. Hutchinson S., Schwab A., Banks M. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in the rhizosphere // Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants / Eds. S.C. McCutcheon, J.L. Schnoor. – John Wiley & Sons, Inc., 2003. – P. 355–386.
21. Зайцев Г.А., Кулагин А.Ю. Формирование корневой системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях техногенеза (Уфимский промышленный центр) // Экология. – 2005. – № 12. – С. 146–149.
22. Pangovan K., Vivekanandan M. Effect of oil pollution on soil respiration and growth of *Vigna mungo* (L.) Hepper // Sci. Total Environ. – 1992. – V. 116, No 1–2. – P. 187–194.
23. Adam G., Duncan H. The effect of diesel fuel on common vetch (*Vicia sativa* L.) plants // Environ. Geochem. Health. – 2003. – V. 25, No 1. – P. 123–130.
24. Baek K.-H., Kim H.-S., Oh H.-M., Yoon B.-D., Kim J., Lee I.-S. Effects of crude oil, oil components, and bioremediation on plant growth // J. Environ. Sci. Health. Part A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng. – 2004. – V. 39, No 9. – P. 2465–2472.

25. Unterbrunner R., Wieshammer G., Hollender U., Felderer B., Wieshammer-Zivkovic M., Puschenreiter M., Wenzel W.W. Plant and fertiliser effects on rhizodegradation of crude oil in two soils with different nutrient status // *Plant Soil*. – 2007. – V. 300, No 1–2. – P. 117–126.
26. Liste H.-H., Felgentreu D. Crop growth, culturable bacteria, and degradation of petrol hydrocarbons (PHCs) in a long-term contaminated field soil // *Appl. Soil Ecol.* – 2006. – V. 31, No 1–2. – P. 43–52.
27. Beck E.H. Regulation of shoot/root ratio by cytokinins from roots in *Urtica dioica*: Opinion // *Plant Soil*. – 1996. – V. 185, No 1. – P. 3–12.
28. McMichael B.L., Quisenberry J.E. Genetic variation for root/shoot relationships among cotton germplasm // *Environ. Exp. Bot.* – 1991. – V. 31, No 4. – P. 461–470.
29. Gaskin S., Soole K., Bentham R. Screening of Australian native grasses for rhizoremediation of aliphatic hydrocarbon-contaminated soil // *Int. J. Phytoremed.* – 2008. – V. 10, No 5. – P. 378–389.
30. Kirk J.L., Klironomos J.N., Lee H., Trevors J.T. The effects of perennial ryegrass and alfalfa on microbial abundance and diversity in petroleum contaminated soil // *Environ. Pollut.* – 2005. – V. 133, No 3. – P. 455–465.
31. Xu J.G., Johnson R.L., Yeung P.Y., Wang Y. Nitrogen transformations in oil-contaminated, bioremediated, solvent-extracted and uncontaminated soils // *Toxicol. Environ. Chem.* – 1995. – V. 47, No 1–2. – P. 109–118.
32. Merkl N., Schultze-Kraft R., Infante C. Assessment of tropical grasses and legumes for phytoremediation of petroleum-contaminated soils // *Water, Air, Soil Pollut.* – 2005. – V. 165, No 1–4. – P. 195–209.

Поступила в редакцию
08.06.09

Халилова Айгуль Фидаилевна – аспирант отдела химии окружающей среды Химического института им. А.М. Бутлерова Казанского государственного университета.
E-mail: ahalilova@gmail.com

Денисова Александра Петровна – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник отдела химии окружающей среды Химического института им. А.М. Бутлерова Казанского государственного университета.
E-mail: alex-andrina@rambler.ru

Бреус Ирина Петровна – доктор биологических наук, профессор, заведующий отделом химии окружающей среды Химического института им. А.М. Бутлерова Казанского государственного университета.
E-mail: Irina.Breus@ksu.ru